

시화호 인공습지의 물흐름 분포 및 입자성물질 퇴적 특성

최동호[†] · 최광순* · 김세원* · 오영택* · 김동섭* · 조성주** · 박제철**

금호건설 기술연구소 · *한국수자원공사 시화호환경연구소 · **금오공과대학교 환경공학과

(2006년 9월 27일 접수, 2007년 4월 3일 채택)

Water Flow Distribution and Sedimentation Characteristics of Particle Materials in the Sihwa Constructed Wetland

Dong-ho Choi[†] · Kwangsoon Choi* · Sea-won Kim* · Young-taek Oh*

Dong-sup Kim* · Seong-Ju Joh** · Je-Chul Park**

Kumho Engineering & Construction, Institute of Construction Technology

**Korea Water Resources Corporation, Lake Sihwa Environmental Research Center*

***Kumoh National Institute of Technology, Department of Environmental Engineering*

ABSTRACT : Flow distribution of water and sedimentation rate were investigated to understand the hydrodynamics and settling characteristics of particulate materials in a constructed wetland for treatment of non-point sources pollutants, the Sihwa constructed wetland, Korea. The Sihwa constructed wetland is divided into three sub-wetlands(the Banwol, the Donghwa and the Samhwa wetlands) to treat the polluted water from three streams, the Banwol stream, the Donghwa stream and the Samhwa stream. From the results of water flow experiment using dye(Rhodamine 50WT Red), it was found that the water flow in the wetland was prevailing at the waterway and open water. Dye was spread slowly in the closed water area planted by plants. The mean hydraulic retention time(HRT) at the upper area of high wetland and lower wetland of Banwol, was found to be 34.1 hr at the upper area and 74.6 hr at the lower area respectively, totaling approximately 108.7 hr(4.5 days). The sedimentation rate was higher at lower area(sites of B, C and D) of the wetland than upper area(site of A which is settling zone). Based on the forecast for 20 years as to the amount of sediment that can be deposited in the open water in the future, the sediment depth of each area would be like this: A: 6.3 cm, B: 8.3 cm, C: 7.0 cm, D: 9.5 cm. The contents of organic materials in the sediment deposited within the sediment trap were found to be higher overly in the first investigation period which had much rainfall, and B, C and D areas were found to have an increased COD accumulation than A area. Also, nitrogen and phosphorus were found to increase in the down-stream of the wetland. The results of this study suggest that a sustainable research and management for the characteristics of water flow pattern and sedimentation changeable as time passes is needs to maintain or improve the efficiency of water treatment in the constructed wetland.

Key Words : *Constructed Wetland, Flow Pattern, Tracer Test, Sedimentation Rate*

요약 : 시화호 인공습지의 수리동력학적 특성과 입자성 물질의 침전특성을 살펴보기위해 물흐름조사 및 입자성 물질의 퇴적을 측정 을 실시하였다. 시화호 인공습지는 크게 3개의 습지(반월, 동화, 삼화)로 나누어 볼 수 있는데 이는 각각의 하천에서 유입되는 비점오 염물질의 처리를 위해 조성되었다. 조사지역은 반월천 고습지를 대표지역으로 선정 후 실시하였다. Rhodamine 50WT Red를 사용하여 물흐름 실험을 수행한 결과 자유수면(open water) 지역과 수로를 통한 물흐름이 주를 이루고 있었으며 식물이 식재되어 있는 폐쇄수역 (closed water)에서의 물흐름이 지체되는 것으로 나타났다. 반월습지의 상부 및 하부 습지의 평균 수리학적체류시간(hydraulic retention time, HRT)은 각각 34.1 hr, 74.6 hr로 나타났으며 총 체류시간은 108.7 hr(4.5 day)이었다. 반면에, 침전율은 침전지(A지역)보다는 하류 부의 open water지역(B, C, D지역)에서 높은 것으로 조사되었다. 향후 open water 내에 축적 가능한 sediment 양을 추정 한 결과 20년 후 각 지역의 침전 깊이는 A: 6.3 cm, B: 8.3 cm, C: 7.0 cm, D: 9.5 cm로 나타났다. sediment trap 내의 유기물 축적량은 강우의 영향으로 1차 조사시기에 가장 높은 것으로 나타났으며 A 지역보다 B, C, D 지역에서의 축적량이 높은 것으로 조사되었다. 또한, 질소, 인 성 분들은 하부습지에서 높게 나타났다. 이러한 결과로 인공습지의 효율적 관리를 위해서는 물흐름 및 입자성 물질들의 퇴적 특성에 대 해 시간 변화에 따른 지속적인 조사 및 관리가 요구되어 진다.

주제어 : 인공습지, 물흐름, 추적자 실험, 퇴적을

1. 서 론

최근 국내에서는 담수호의 수질보전을 위해 인공습지와 저

류지를 하천이나 담수호 상류부에 조성하는 방안이 계속해서 진행 중에 있다.¹⁾ 이는 점 및 비점오염원에 의해 상류 수역 의 오염도가 심화되어지고 있고 오염물질의 정화 및 친환경 적 수계관리 시스템 접목이 중요하게 받아들여지고 있기 때 문이다. 습지는 영구적으로 또는 계절적으로 습윤상태를 유 지하고 있고 종의 다양도가 높고 생산성이 높은 생태계이

[†] Corresponding author

E-mail: dhchoi1@kumhoenc.com

Tel: 031-322-6986

Fax: 031-322-3741

다.^{2~4)} 또한, 인공습지는 다양한 오염부하에 대한 적응능력이 높고, 에너지의 필요성이 낮고 유지관리가 용이하여 경제적이란 측면 외에 경관과 친수공간의 가치를 가질 수 있어 자연친화적이라는 측면에서 관심을 받고 있다.

인공습지는 인위적으로 바닥의 기질과 경사를 조정하고 수리학적 현상을 제어할 수 있고 수생식물과 다른 요소들을 관리할 수 있기 때문에 동일한 면적의 자연습지에 비하여 훨씬 효과적으로 정화기능을 수행할 수 있다.³⁾

대부분의 인공습지는 관형흐름반응(Plug flow reactor, PFR)의 이상적 흐름으로 고려하여 설계되어져 왔으나^{5~7)} 최근의 몇몇 연구에 의해 관형흐름반응(PFR)과 완전혼합반응(Continuous stirred tank reactor, CSTR)의 혼합형태에 가깝다고 보고되고 있다.^{8~10)} 더우기, 이론적 체류시간은 습지의 바닥상태등의 유효면적을 고려하지 않거나 물이 흐르지 않고 흐름이 더딘 지역을 포함시켜 자유수면지역(open water)의 흐름으로 이론적 체류시간을 산정하기 때문에 실제 체류시간은 이론적 체류시간보다 대체로 작게 나타난다.¹⁰⁾ 또한, 습지내 체류시간은 강우사상 및 식생 밀도에 의해 크게 영향을 받기 때문에 이론적 체류시간과 실제 체류시간에는 차이가 발생한다. Levenspiel¹¹⁾은 습지내 체류시간 파악에 있어 중요한 요소들로서 수체의 channeling(偏流), 흐름중 발생하는 수체의 순환 그리고 사수역(dead zone)에서의 물흐름 저해 등을 언급하였으며 습지설계시 이러한 사항을 고려하지 않는다면 설계에 큰 오류가 생길 수 있다고 지적하였다. 실제 이러한 문제 등으로 인공습지 운영시 입자성 물질들의 불균일한 퇴적이 일어나며 경사도가 바뀌어 일부지역의 수심이 낮아지고 유기성 오염물질의 퇴적으로 인해 혐기성화가 빠르게 진행될

수 있다.

인공습지에서 염료를 이용한 체류시간 조사는 습지내 물흐름의 수리동역학적 특성을 알아보고 어떤 형태의 물흐름이 이루어지고 있는 지에 대해 알고자 할 때 매우 유용하게 쓰일 수 있다.¹²⁾ 습지내 물흐름 특징을 살펴보면 대부분의 흐름이 자유수면지역을 따라 흐르며 식생이 없고 깊은 곳이 가장 짧은 지체시간을 나타낸다. 반면에 수초대 측면 흐름영역에서는 물흐름, 유속변화가 크지 않다. 수초대가 있는 지역은 그렇지 않은 지역에서 보다 유속이 10%까지 감소하는 것으로 나타났다.¹³⁾ 습지내에서 물흐름의 특성과 더불어 입자성 물질의 퇴적도 습지의 운영관리에 있어 주요사항이 될 수 있다. 습지내 입자성 물질의 퇴적특성을 살펴보기 위해서는 sediment trap을 사용하며 이를통해 입자성물질의 수지(burget)나 플럭스(flux)를 계산하는데 쓰인다.¹⁴⁾

본 연구에서는 2002년 개장되어 운영된 지 4년째에 접어들고 있는 시화호 인공습지 중 규모가 가장 큰 반월천 고습지에서 물흐름 특성을 살펴보고 이론적 체류시간과 실 체류시간의 차이와 습지내 물흐름이 저조한 사수역을 파악하고자 하였다. 또한, 반월천 고습지내 자유수면지역에 총 7개의 sediment trap을 설치하여 강우시와 평상시 퇴적물의 퇴적속도와 최적물내 물질함량을 조사하여 향후 습지내에 축적될 수 있는 입자성 물질의 양을 예측하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지 개요

시화호 인공습지는 시화호 상류하천인 반월천, 동화천, 삼

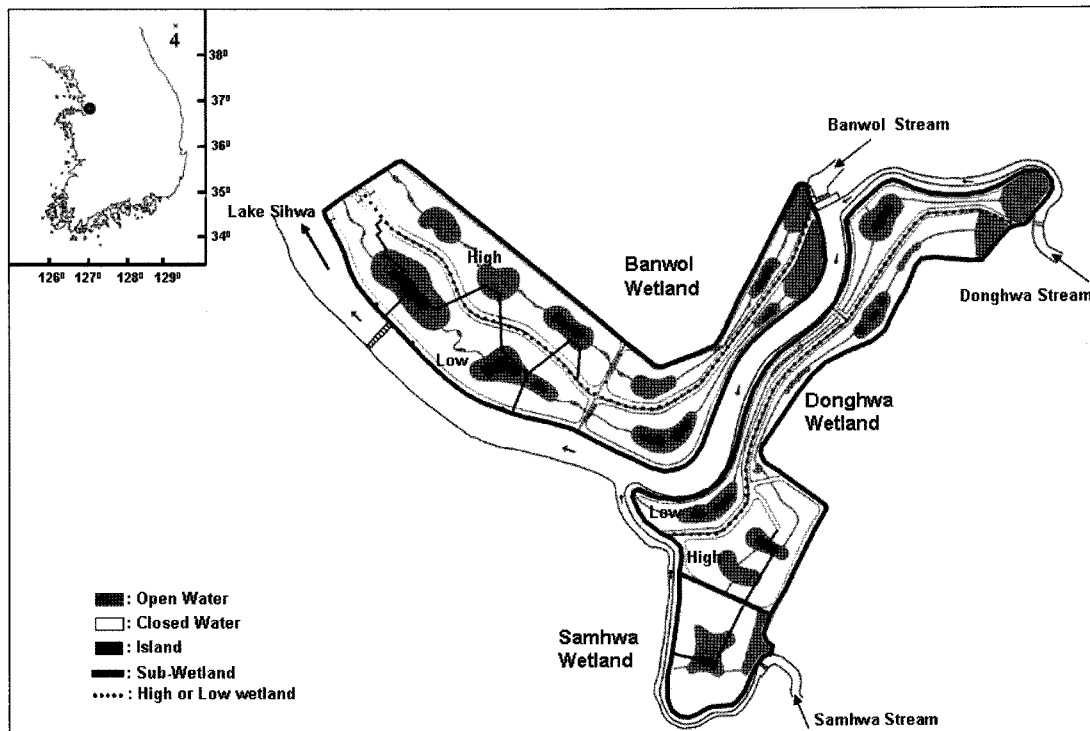


Fig. 1. Schematic of the Sihwa Constructed Wetland.

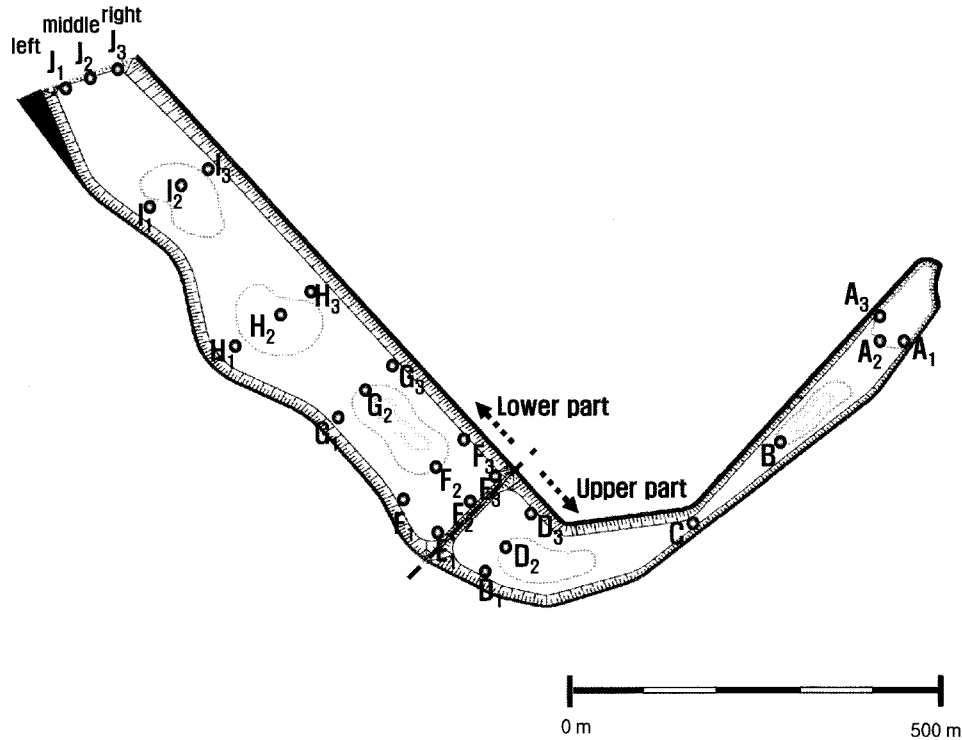


Fig. 2. Sampling sites of flow test in Banwol high wetland.

화천 합류지점의 간석지인 경기도 안산시 본오동 및 경기도 화성군 비봉면 일원에 위치한다. 총 규모는 104 ha(1,037,500 m²)이며, 반월천, 동화천 습지는 습지 조성지역의 지형 특성상 고습지와 저습지로 구분된다. 그러나 삼화천은 고·저습지 구분이 없다. 반월천 습지가 총 면적 42 ha(415,952 m²), 동화천 습지 27 ha(265,999 m²), 삼화천 습지 7 ha(68,972 m²)로서 순 습지 면적은 76 ha에 달하고 있다.¹⁵⁾

이중 반월천 고습지 및 동화천 고습지는 스크류 펌프(1기: 540 m³/hr)를 이용해 하천수를 유입시키고 저습지는 자연유하 방식으로 원수가 유입된다. 스크류펌프 1기당 설계유량은 540 m³/hr이었으나 88-93%(480-500 m³/hr)의 실질유량을 보였으며 펌프 운전은 반월천 유량에 가변적으로 대응할 수 있도록 총 3기가 운전되고 있다. 유입유량은 하천 수위에 따라 가변적으로 상시 운전된다.

본 연구에서는 반월천 고습지를 대상으로 물흐름 조사를 시행하였으며 이를 통해 습지내 물흐름 특성을 파악하고 각 조사지점에서의 평균 체류시간 및 사수율을 파악함으로써 향후 물흐름 개선이 필요한 지역을 파악하고자 하였다. 반월천 고습지 조사지역 개략도는 Fig. 1과 같다.

2.2. 조사 기간 및 지점

2.2.1. 물흐름 조사

습지내 물흐름 조사를 위한 실험은 반월천 고습지에 스크류펌프 1기(540 m³/hr)를 이용하여 하천수를 지속적으로 유입시키면서 2005년 7월 2일 오전 10시부터 1시간 간격으로 조사가 이루어졌다. 염료투입은 유출부에서 최소 검출 농도인 0.07 mg/L를 만족하도록 충분한 양을 고려하여, 고습지 유

입부(저류조)에 Rhodamine 50WT(Red) 용액 20.5 L를 일시적으로 투입하였고 상류습지 실험 종료 후 하류습지 유입부에 동일 양을 투입한 후 조사를 수행하였다. 흐름조사는 사진촬영, 육안관찰 및 기록이었으며 지정된 위치에서 sampling 후 채수한 시료는 UV-Spectrophotometer(Varian CARY 300 Dio, USA)를 이용해 560 nm에서 분석하였다.

물흐름 조사를 위한 시료 채취는 상류습지 5개 지점(A, B, C, D, E)과 하류습지 5개 지점(F, G, H, I, J)에서 수행하였고, 각 지점마다 좌측(1) 중앙부(2), 우측(3)으로 나누어 각각의 흐름특성을 살펴보았다.

2.2.2. 염료의 특성

염료추적자로서 Rhodamine 50WT(Red) 용액은 560 nm 파장대의 빛을 흡수/방출하는 형광특성을 가지고 있기 때문에 수체의 흐름특성을 관찰하기에 용이하고 수중의 부유물질 흡착성이 적으며 생물에 대한 안정성도 크고 수일~수개월 내에 광분해한다는 특징을 가지고 있다. 이에 국·내외 하천 및 습지의 염료추적자로 많이 사용되고 있으며 여러 논문을 통해 많은 연구사례가 발표되고 있다.^{12,17~19)}

2.2.3. 입자성물질 퇴적특성 조사

시화호 인공습지 중 반월천 고습지 네 지점의 open water에 총 7개의 sediment trap을 설치하여 강우시와 평상시 이 지역에서 퇴적물 양과 입자성 오염물질에 흡착되어있는 유기물 및 영양염류를 분석하여 향후 습지 내에 축적될 수 있는 퇴적물의 양 및 오염물질 양을 파악하고자 하였다. sediment trap은 1차(2005년 7월 22일~8월 2일), 2차(2005년 8월 3일~

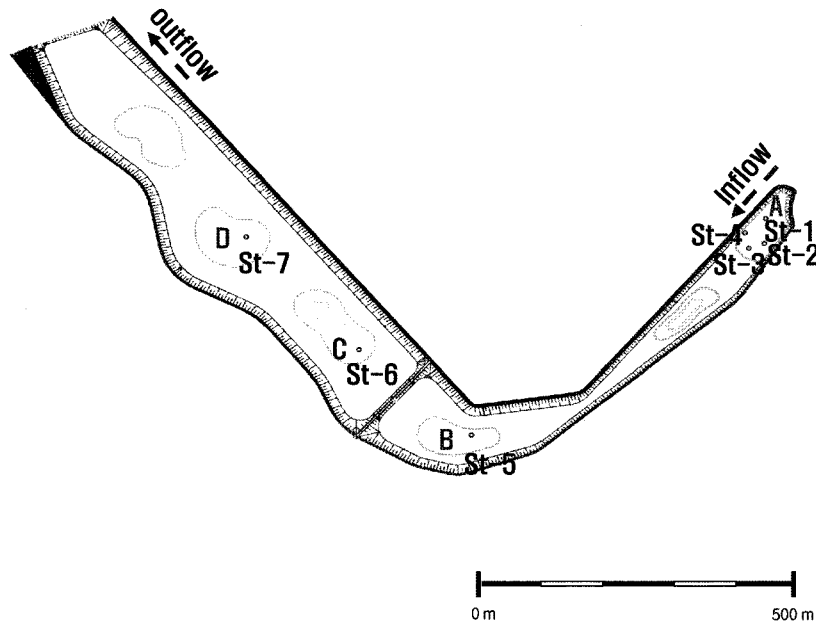


Fig. 3. Site on sediment trap installation in Banwol high wetland.

8월 18일, 3차(2005년 8월 19일~9월 5일) 총 3차에 걸쳐 반월천 고습지에 설치 후 sampling 하였다. 반월천 고습지는 총 6지의 open water가 존재하며 이중 7개의 대표지점을 선정하여 원수 유입부인 침전지 상부 A지역중 유입부 1개 지점, 하류 3개 지점 등 총 4개 지점, B지역 open water 1개 지점, C지역 open water 1개 지점, D지역 open water 1개 지점에 sediment trap을 설치하였다(Fig. 3).

퇴적물의 유기물, 질소, 인은 “해양오염공정시험방법(2002)”에 의해 수행되었다.¹⁶⁾

Sediment trap의 제원은 상부 hoper 부분의 직경이 25 cm이며, 하부는 포집망을 육안으로 확인하기 위하여 투명 acryle로 제작 하였고 길이 50 cm, 직경 5 cm이었다. 또한 trap을 지지하기 위하여 trap 주변으로 3개의 guard를 설치하였다(Fig. 4).

3. 결과 및 고찰

3.1. 물흐름특성 조사

습지내에서의 물흐름 특성을 PFR과 CSTR의 중간 형태로 가정하였다. 습지내의 흐름을 이러한 형태로 가정한 것은 각 지역의 특성에 따라 체류시간과 반응정도가 달라지고 관형 흐름과 완전혼합이 복합적으로 이루어지기 때문이다. 이에 습지를 커다란 반응기로 가정하고 시간에 대한 염료의 표준화된 분포를 나타내는 것을 체류시간분배곡선(residence time distribution curve)라고하며 E-curve로 정의된다.²⁰⁾ E-curve는 습지내 물 흐름특성 및 평균 체류시간에 의해 결정되어진다. 현장 시료를 UV에 의해 실측된 측정값을 통해 염료의 투입 전 농도를 zero line으로 하고 투입후의 변화 농도에 따라 아래의 계산 과정을 거쳐 E-curve를 구할 수 있는데 이를 통해 습지내의 실제 평균 체류시간(tm), 분산(σt) 및 치우침(skewed) 정도 등을 알 수 있다. 여기에서 skewed 값은 양의 값이 나올 경우 평균 체류시간보다 앞서 유출됨을 의미하고 음의 값이 나올 경우 평균 체류시간보다 이후에 유출됨을 의미한다. 즉, 음의 값이 나올 경우 평균 체류시간보다 이후에 유출됨을 의미해 지체시간이 길어짐을 나타낸다.

이 값은 실측치에 의해 전체 면적을 C_{out}/C_{in} 의 값으로 적분해 식 (1)과 같이 AC로 나타낼 수 있다.

$$Ac = \frac{1}{\Delta C} \int_0^{\infty} C_{out}(t) dt \quad (1)$$

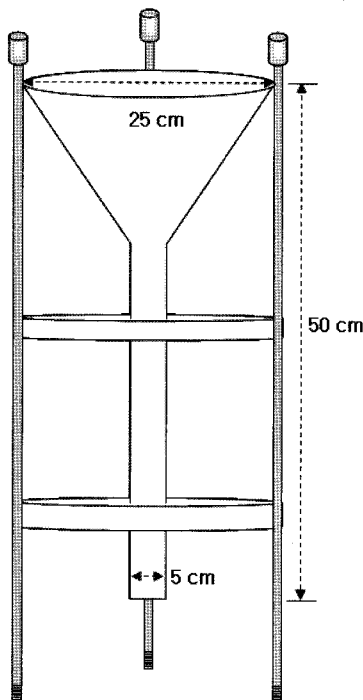


Fig. 4. Schematic of sedimentation trap.

E-curve는 식 (2)와 같이 정의 될 수 있다.

$$E(t) = \frac{C_{out}(t)/C_{\Delta}}{\int_0^{\infty} \frac{C_{OUT}(t)}{C_{\Delta}} dt} = \frac{C_{OUT}(t)/C_{\Delta}}{A_C} \quad (2)$$

또한, E-curve의 전체 면적은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = \frac{\int_0^{\infty} C_{OUT}(t)dt}{\int_0^{\infty} C_{OUT}(t)dt} \quad (3)$$

식 (3)을 적분하여 식 (4)와 같이 1로 정규화 시킬 수 있다.

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1 \quad (4)$$

이를 통해 mean residual time(tm), variation(σt), skewness(S)를 구하는 식은 아래와 같으며 tm은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} tE(t)dt}{\int_0^{\infty} E(t)dt} \quad (5)$$

식 (4)에서 $\int_0^{\infty} E(t)dt$ 은 1 이므로 식 (6)과 같다.

$$t_m = \int_0^{\infty} tE(t)dt \quad (6)$$

σt는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_t^2 = \int_0^{\infty} (t - t_m)^2 E(t)dt \quad (7)$$

이를 다시 정리하면 식 (8)로 정리할 수 있다.

$$\sigma_t^2 = \int_0^{\infty} t^2 E(t)dt - t_m^2 \quad (8)$$

S는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(s_3)^3 = \frac{1}{\sigma_t^{1.5}} \int_0^{\infty} (t - t_m)^3 E(t)dt \quad (9)$$

염료 추적자 실험결과 상류습지의 침전지 중앙 유출부(A2)

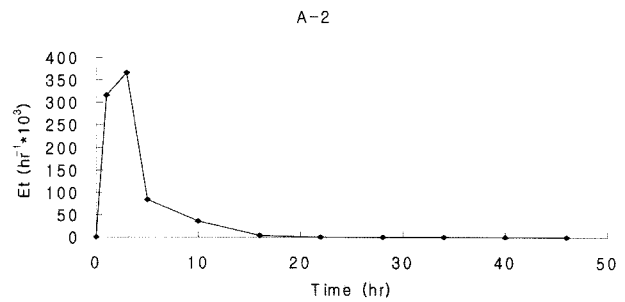


Fig. 5. E-curve with site A-2.

Table 1. Value of tm, σt, S with each site in Banwol high wetland

Site	Contents	tm (hr)	variation (σt, hr)	Skewed (S, hr)	Most fluid elements spend time(hr)	
Upper part	A2	5.5	2.26	1.55	3.2~7.8	
	D	D1	27.8	5.51	-1.36	22.3~33.3
		D2	24.0	6.23	1.24	17.8~30.2
		D3	27.1	5.60	-1.79	21.5~32.7
	E	E1	22.3	4.62	2.16	17.7~26.9
		E2	26.1	4.93	0.56	21.2~31.0
E3		34.1	3.53	-0.94	30.6~37.6	
Lower part	H	H1	47.6	8.05	2.00	39.6~55.7
		H2	31.2	11.06	3.06	20.1~42.3
		H3	38.8	16.08	11.19	22.7~54.9
	I	I1	64.5	10.53	2.68	54.0~75.0
		I2	63.5	7.35	1.30	56.2~70.1
		I3	66.7	10.48	2.22	56.2~77.2
	J	J1	74.6	10.24	2.62	64.4~84.8
		J2	70.8	9.40	2.92	61.4~80.2
		J3	72.0	10.10	3.00	61.9~82.1

의 평균 체류시간은 5.5 hr, 분산은 2.26 hr, 치우침 정도는 1.55 hr으로 나타났다. 침전지 지역은 수생식물이나 인공구조물이 없어 수류에 저항을 주는 요소가 없었으며 이로 인해 분산값이 작았던 것으로 판단된다(Fig. 5).

이와 같은 방식으로 각 지역에 대한 E-curve를 작성하여 분석한 결과는 Table 1과 같다.

A지역에서 D지역 사이에는 대부분 수로를 통해 유하하는 형태를 보였고 B지점의 자유수면(open water) 지역에서 혼합이 많이 이루어져 좌·우측 식생 밀집지역으로 확산되는 경향을 보였다. 그러나 좌·우측 식생 밀집지역으로 확산되는 속도는 중앙부보다 많이 느린 경향을 보였다. 이는 식생이 밀집된 지역으로 염료가 확산된 후 수류저항이 커져 유출되는 속도가 늦어진 것으로 판단된다. 이로 인해 염료가 D지역까지 내려오면서 중앙부(D2)에서의 평균 체류시간이 약 24.0 hr로 빨랐고 좌측(D1) 27.8 hr, 우측(D3) 27.1 hr으로 좌·우측 도달시간이 상대적으로 늦게 나타났다.

상부습지의 최종유출부인 E지역에서의 평균 유출시간은 E1: 22.3 hr, E2: 26.1 hr, E3: 34.1 hr으로 E3지역에서 늦게 유출

되는 것으로 나타났는데 이 지역은 갈대 및 부들의 식생 밀도가 높으며 수심이 낮아 수류 저항으로 인해 확산이 늦게 되어 유출시간이 길어졌던 것으로 판단된다.

상부습지 체류시간 측정결과 유입 후 최종 유출까지 걸리는 시간은 E₃를 기준으로 약 37.6 hr이었으며 흐름이 중앙부를 중심으로 진행되어 좌·우측 식생 밀도가 높은 지역에서의 유출이 느린 것으로 나타났다.

상부습지 실험을 마치고 약 10일 경과 후 하부습지 F지역에 Rhodamine 50WT(Red) 용액 20.5 L를 수로의 일직선상에 균일하게 혼합해 주었다. 염료 투입 후 I지역에서 상류습지와 마찬가지로 자유수면(open water)지역과 수로를 통해 많은 양이 이동하는 것을 볼 수 있었으며 좌·우측의 식물 식재가 많은 closed water 쪽에서는 유입된 염료의 확산속도가 느리고 정체됨을 볼 수 있었다.

H지역에서는 F 및 G지점에서 확산된 염료가 H지역의 open water를 지나면서 중앙부(H₂)에서의 흐름속도가 좌측(H₁), 우측(H₃)보다 빨랐다. H지점에서의 평균 체류시간은 H₁: 47.6 hr, H₂: 31.2 hr, H₃: 38.8 hr로 나타났다. 특히, H₁과 H₃ 지역은 갈대 및 부들의 식생밀집 원인으로 염료의 유출시간이 H₂에 비해 느렸으며 H₃의 σ 및 S값이 큰 이유는 H₂ 지역에서 흐름이 빨리 이루어지면서 이 지역으로 염료가 확산되어 peak가 이중으로 검출되었기 때문으로 판단된다.

I 지역의 경우 H지역에서의 혼합, 확산, 희석효과로 인해 농도 값이 다소 저하되는 것으로 나타났다. 이 지역에서도 다른 지역과 마찬가지로 open water 중앙부에서의 도달시간이

빨리 나타났다. 각 위치별 평균 체류시간은 I₁: 64.5 hr, I₂: 63.5 hr, I₃: 66.7 hr로 나타났다. 최종 유출시간 역시 I₃ 지역에서 가장 늦게 나타났다.

J지역의 경우 최종 방류구로서 평균체류 시간은 J₁: 74.6 hr, J₂: 70.8 hr, J₃: 72.0 hr로 중앙부와 우측에서 빨리 나타났다. I지역에서 J지역까지의 흐름은 좌·우측 식생밀도가 높고 염료의 이동이 거의 대부분 수로를 따라 유출되어 최초 관측지점(61.4 hr)에서 최종 유출시간(84.8 hr)까지의 시간이 오래 걸린 것으로 판단된다. 반월천 하부습지의 총 체류시간은 J₁: 84.8 hr, J₂: 80.2 hr, J₃: 82.1 hr로 최종 유출시간이 가장 길었던 J₁지점을 기준으로 총 84.8 hr가 걸리는 것으로 조사되었다.

이에 반월천 고습지 상부와 하부습지의 평균 체류시간은 상부습지 34.1 hr, 하부습지 총 74.6 hr로 약 108.7 hr(4.5 day)로 조사되었으며 최종 유출시간을 기준으로 살펴보면 상부습지 37.6 hr, 하부습지 84.8 hr로 122.4 hr(5.2 day)가 소요되는 것으로 조사되었다. 상부 및 하부습지 실험 종료후에도 유출수의 색깔이 다소 붉은 색을 띠었으나 Rhodamine의 검출한계는 0.07 mg/L으로 UV₅₆₀에서는 검출되지 않았다. 이는 습지의 특성상 습지내 수생식물 밀집지역에 유입된 염료가 느린 유속으로 인해 서서히 확산·희석되어 저농도 유출시간이 길어진 원인으로 판단된다. 저농도 유출은 분석이 되지 않아 정량화에 어려움이 있었다.

체류시간을 통해 습지의 수리특성을 파악한 결과 수로와 자유수면지역(open water)에서의 흐름이 주를 이루고 있었으며,

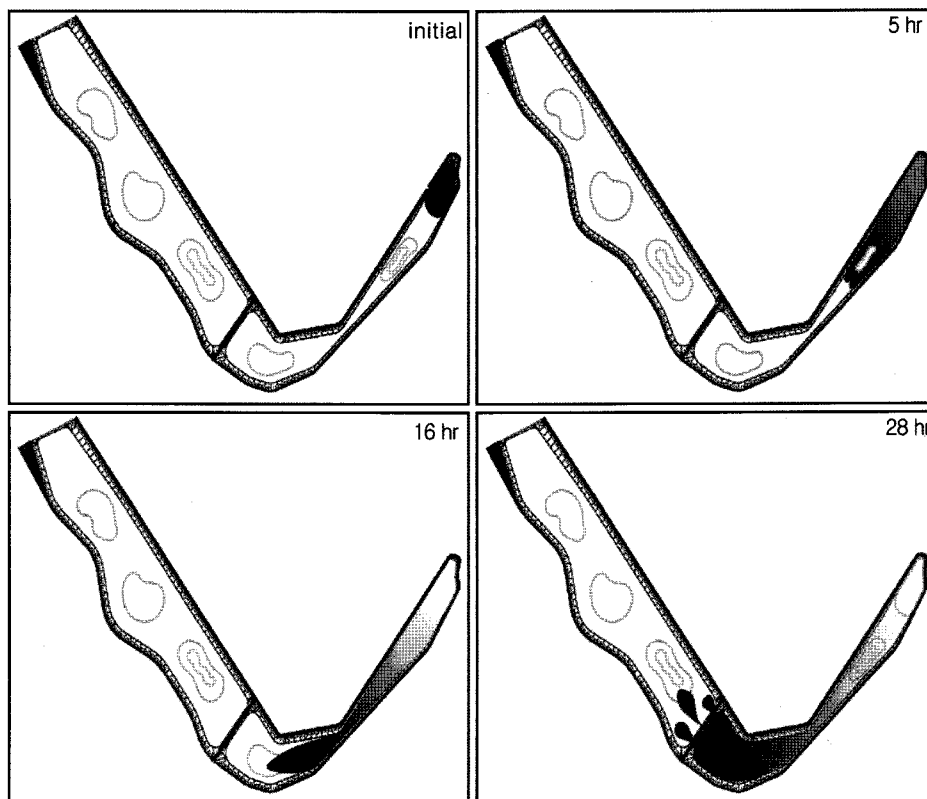


Fig. 6. Tracer flow diagram on upper part in Banwol high wetland.

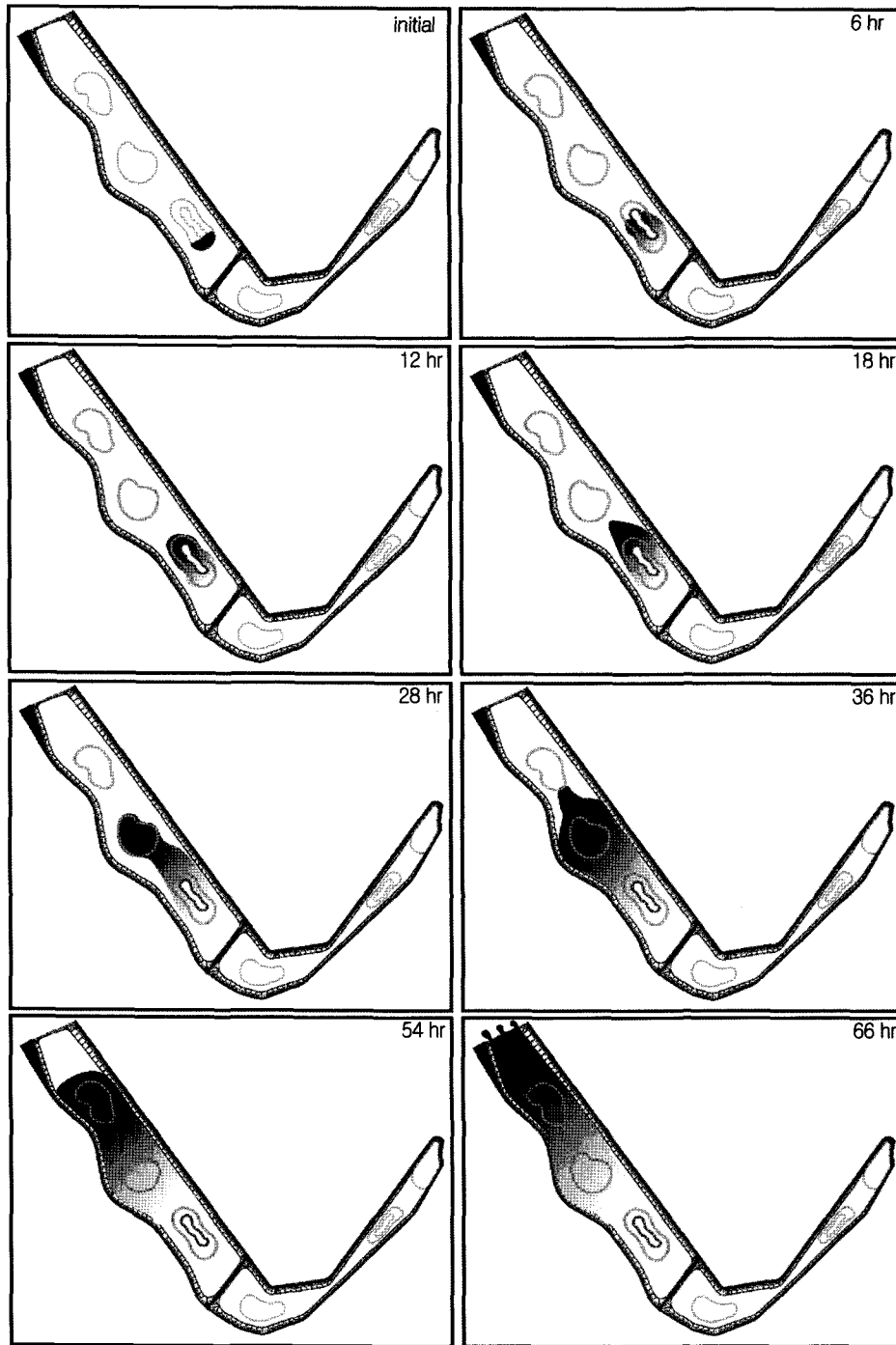


Fig. 7. Tracer flow diagram on lower part in Banwol high wetland.

이로 인해 습지 전체로는 부분별로 상이한 체류시간을 나타내고 있어 습지 내 흐름의 균일화를 위한 수리특성의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

체류시간 실측을 통해 반월천 고습지에는 다음과 같은 수리특성이 확인되었다.

첫째, 긴급 배수를 위해 습지 내에 조성한 수로 및 자유수면지역(open water)으로 수체의 흐름이 주를 이루고 있었고 (Table 1에서 동일지역이라도 물흐름이 빠른지역, D₂, E₁, H₂, I₂, J₂지역), 이는 수로부분이 식생지역에 비해 흐름을 막는

식생, 구조물 등의 장애물이 없어 수리 저항이 작았기 때문인 것으로 판단된다.

둘째, 갈대가 식재되어 있지 않은 자유수면지역에서 수체의 이동이 컸는데 동일 지점의 횡방향으로 갈대가 식재된 지역으로 염료가 유입되어 지체되는 시간이 중앙부보다 상당히 길었다. 이렇듯 실험 결과 침전지를 통해 유입된 유입수의 이동은 수리 저항이 없는 수로와 자유수면지역(open water)을 중심으로 이동되며, 식생 밀집지역으로 이동이 있으나 지체시간이 길어짐을 알 수 있었다.

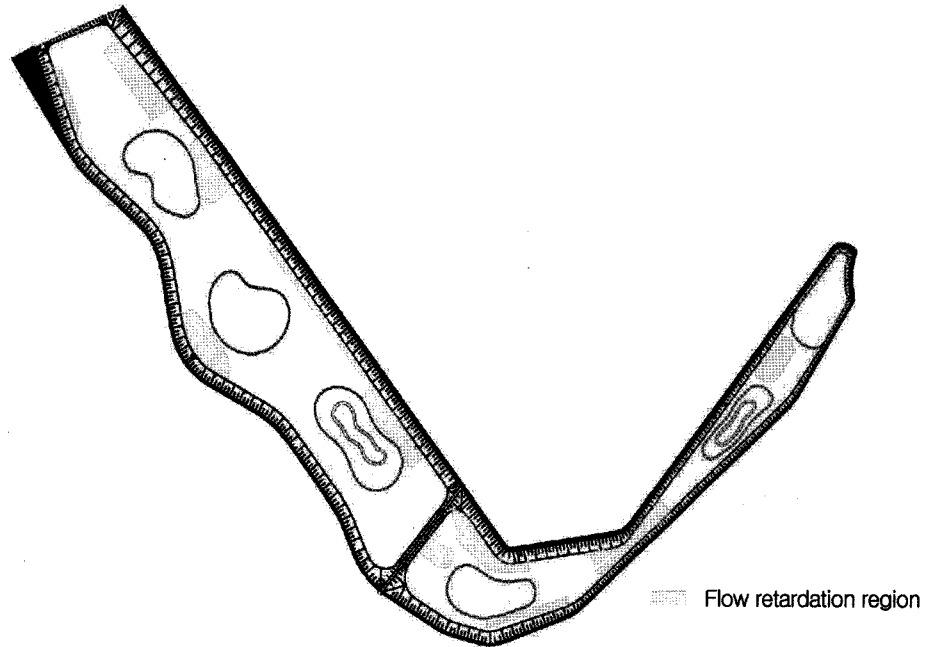


Fig. 8. Flow retardation region in Banwol high wetland.

Table 2. Sedimentation characteristics of particulate material in sediment trap

Date and site	Contents	SS		VSS		Particle distribution			rainfall (mm)
		sediment mass per day(g/day)	sediment mass per unit area(g/m ² /day)	sediment mass per day(g/day)	sediment mass per unit area(g/m ² /day)	clay (%)	silt (%)	sand (%)	
1st investigation (22. Jul. ~ 2. Aug.)	A(st-1)	0.90	18.4	0.08	1.6	10.5	76.7	12.8	167
	A(st-2)	0.99	20.2	0.11	2.3	11.4	78.1	10.5	
	A(st-3)	0.52	10.6	0.05	1.0	10.4	80.2	9.4	
	A(st-4)	0.75	15.2	0.29	5.9	10.4	73.9	15.6	
	A(ave.)	0.79	16.1	0.13	2.7	10.7	77.2	12.1	
	B(st-5)	0.74	15.1	0.10	2.0	9.5	82.3	8.2	
	C(st-6)	0.44	8.9	0.08	1.7	6.8	74.5	18.8	
	D(st-7)	0.82	16.8	0.10	2.0	8.6	84.4	7.1	
	Total ave.	0.70	16.1	0.15	3.08	9.8	78.4	11.8	
2nd investigation (3. Aug. ~ 18. Aug.)	A(st-1)	0.35	7.1	0.04	0.9	15.9	79.8	4.3	85
	A(st-2)	0.36	7.3	0.04	0.9	16.0	80.2	3.8	
	A(st-3)	0.37	7.5	0.04	0.8	13.6	81.0	5.4	
	A(st-4)	0.64	13.1	0.08	1.7	13.7	82.5	3.8	
	A(ave.)	0.43	8.8	0.05	1.1	19.0	76.4	4.6	
	B(st-5)	0.57	11.5	0.08	1.7	17.1	78.2	4.7	
	C(st-6)	0.48	9.8	0.09	1.8	11.2	79.9	8.9	
	D(st-7)	0.57	11.5	0.08	1.7	9.8	82.4	7.8	
	Total ave.	0.51	10.4	0.07	1.6	16.3	77.5	6.2	
3rd (19. Aug. ~ 5. Sep.)	A(st-1)	0.37	7.5	0.01	0.1	12.4	81.0	6.6	78
	A(st-2)	0.36	7.3	0.04	0.8	13.8	83.7	2.5	
	A(st-3)	0.32	6.5	0.06	1.2	12.4	83.6	4.0	
	A(st-4)	0.39	8.0	0.02	0.3	11.3	84.7	4.0	
	A(ave.)	0.36	7.3	0.03	0.6	12.5	83.3	4.3	
	B(st-5)	0.64	13.0	0.15	3.1	7.7	86.8	5.6	
	C(st-6)	0.44	8.9	0.13	2.6	5.6	79.4	15.0	
	D(st-7)	0.50	10.1	0.07	1.4	6.8	84.9	8.3	
	Total ave.	0.48	9.8	0.08	2.0	10.3	83.4	6.3	

셋째, 이러한 수리특성은 습지내의 각 부분에서 체류시간이 각각 상이하게 나타나는 현상을 초래하여 설계된 습지의 체류시간이 비효율적이며 특히, 부분별로 상이한 체류시간은 습지 내 퇴적물의 분포도 각각 다르게 하여 퇴적도의 분해기작을 특정지역에서 과다하게 일으킬 수 있고 과다한 체류시간으로 인한 혐기화발생 우려가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 6~7은 앞부분에 설명했던 내용을 염료 투입 초기부터 시간대 별로 염료의 흐름특성을 모식도로 나타낸 것이다.

Fig. 8은 앞선 물흐름 조사 결과 물흐름이 원활하지 못한 지역을 나타낸 것이다. 이들 구역은 식물의 식재 밀도가 높은 closed water 지역에서의 물흐름이 open water 보다 상당히 지체 되는 특성을 보여 주었다. 상부 습지의 경우 습지의 식생 밀도가 높고 식물 고사체의 양도 많아 물흐름이 느려, 하부 습지의 경우 고사체가 많으며 경사도가 큰 오른쪽에서의 물흐름이 대체로 좋지 않은 것으로 나타났다.

이렇게 습지내의 물 흐름이 균일하지 않게 되면 유량 분배가 원활하지 않게 되고, 결국 습지식물에 의한 수처리 효율을 저하시키는 결과를 가져오게 된다. 특히 물흐름이 없는 사수역(dead zone)은 식물에 오염물질의 접촉이 없기 때문에 식물을 이용하여 수처리를 하고자 하는 습지의 기능을 상실시키는 결과를 가져올 수 있다. 결과적으로 시화호 인공습지의 물흐름 특성은 습지가 조성된 후 4년이 경과되면서 가져온 환경변화에 의해 나타난 현상으로 습지의 수질정화효율을 향상시키기 위해서는 주기적으로 수리특성조사를 통한 개선대책이 필요할 것으로 사료된다.

3.2. 입자성물질 퇴적특성 조사

3.2.1. 퇴적물 퇴적 특성 및 향후 퇴적량 예측

3차에 걸쳐 sediment trap Fig. 4를 이용해 축적량을 조사한 결과는 Table 2와 같다. 퇴적물 퇴적 특성은 유입하천의 수질 특성 및 강우시 유입되는 토사에 기인한다고 볼 수 있다. 이에 각 기간의 강우량을 조사한 결과 1차(7월 22일~8월 2일) 167 mm, 2차(8월 3일~8월 18일) 85 mm, 3차(8월 11일~

9월 5일) 78 mm로 1차 강우량이 상대적으로 많았다.²¹⁾

강우량이 많은 1차 조사 시기에 A지역(침전지) 단위면적당 축적량이 2, 3차에 비해 약 2배가량 높은 것으로 조사되었다. 입도분포에서는 강우량이 많았던 1차에 상대적으로 sand 성분이 많았으며 clay 성분이 감소된 것을 확인할 수 있었다. 이는 강우시기에 유입원수의 탁도 증가로 인해 상대적으로 무거운 sand가 다량 유입·침전되고 clay는 강우가 적은 시기에 비해 상대적으로 유속 및 유량증가로 인해 trap 안에 안정적으로 포집되지 못했기 때문으로 판단된다.

trap 안에 포집된 입자성 물질들은 유입 탁도에 기인한 것과 유량 증가로 인한 퇴적도 채부유의 두 가지 요인으로 판단할 수 있으나 본 연구에서는 이에 대한 구분은 하지 않았다. 전체적으로 볼 때 SS양중 VSS가 차지하는 비율은 전체평균 1차: 13%, 2차: 15%, 3차: 20%로 강우량이 적은 3차시기에 VSS 함량이 상대적으로 높게 나타났다. 조사기간 동안 유입부하량은 유입수의 SS를 측정 후 연속적으로 산정된 유입유량을 고려하여 계산하였다. 또한, 일 퇴적물량은 조사기간 동안 sediment trap 안에 축적된 량의 건조 증량을 구하여 단위 면적당 퇴적량으로 환산 후 각 open water 면적에 대비하여 산출하였다. 산출된 총유입량과 퇴적량으로부터 각 기간의 open water 포착효율은 식 (10)에 의해 계산되었으며 각각의 open water에 대한 포착 효율은 Table 3과 같다.

$$\text{open water 포착효율(퇴적율)} = \frac{\text{퇴적된 총량}}{\text{유입된 총량}} \times 100 \quad (10)$$

분석결과 각 open water에서의 유입 SS 부하 대비 퇴적율은 다소 다른 경향을 나타내고 있다. 침전지인 A 지역의 경우 평균 포착율이 약 30%로 B, C, D 지역에 비해 상대적으로 포착효율이 적게 나타났다(Table 3). 이는 A 지역의 수심이 다른 지역에 비해 약 1 m 정도 깊고 이로 인해 바닥에 침전되는 시간이 길어지게 되며 상대적으로 유입수가 유

Table 3. Inflow loading mass and capture efficiency from sediment trap

Date and site	Contents	Influent SS (mg/L)	Open water volume(m ³)	Inflow loading mass(kg/day)	Sediment mass per unit area(g/m ² day)	Open water area(m ²)	Sediment mass per day(kg/day)	Capture efficiency(%)
1st investigation (22. Jul. ~ 2. Aug.)	A	24	12,917	310	16.1	7,382	119	38
	B	33	7,382	244	15.1	9,227	139	57
	C	20	3,514	70	8.9	4,392	39	56
	D	29	7,027	204	16.8	8,784	148	72
2nd investigation (3. Aug. ~ 18. Aug.)	A	18	12,917	233	8.8	7,382	65	28
	B	23	7,382	170	11.5	9,227	106	62
	C	16	3,514	56	9.8	4,392	43	77
	D	22	7,027	155	11.5	8,784	101	65
3rd (19. Aug. ~ 5. Sep.)	A	30	12,917	388	7.3	7,382	54	14
	B	19	7,382	140	14.0	9,227	129	92
	C	17	3,514	60	8.9	4,392	39	65
	D	18	7,027	126	10.1	8,784	89	70

입되는 지역으로 유속이 증가하고 유량이 많아지면서 침전 효율이 저하된 것으로 판단된다. 또한, 하류로 내려갈수록 침전 효율이 지속적으로 증가하는 경향을 보였는데 이는 수심이 낮고 유속이 느린 영향으로 파악할 수 있다. 강우시기와 비교해 보면 강우량이 많았던 1차 조사시기에 유입 총량이 많았으나 포착효율은 2, 3차 시기에 많았다.

습지 내에서의 퇴적속도 측정은 향후 퇴적물 관리의 효율적 파악에 유용하게 쓰일 수 있다. 아래의 식 (11)과 (12)는 일반 호소에 쓰이는 퇴적량 및 퇴적속도 공식으로 본 연구에 적용하여 계산하였다.²²⁾

$$W = W_{clay}P_{clay} + W_{silt}P_{silt} + W_{sand}P_{sand} \quad (11)$$

$$WT = W1 + 0.4343K \left[\frac{T}{T-1} (\log_e T) - 1 \right] \quad (12)$$

여기서,

W는 퇴적물 단위중량, kg/m³

P_{clay}, P_{silt}, P_{sand}는 퇴적물중 점토, 실트, 모래의 비율, %

W_{clay}, W_{silt}, W_{sand}는 점토, 실트, 모래의 단위중량 계수, kg/m³ (Table 4)

WT는 T년 후 open water에 존재하는 퇴적물의 평균 단위중량, kg/m³

W1은 식 (11)로부터 구한 퇴적물의 초기단위 중량, kg/m³

K는 K_{clay}P_{clay} + K_{silt}P_{silt} + K_{sand}P_{sand}으로 상수(Table 5)

Table 4. Characteristics of unit weight(W) with sediment condition

Classification	Sediment conditions	Constant W(kg/m ³) value of unit weight		
		W _{clay}	W _{silt}	W _{sand}
1	always deep submerged(water level: over 30 cm)	416	1,120	1,550
2	always shallow submerged(water level: below 30 cm)	561	1,140	1,550
3	always out of water(water level: almost 0 cm)	641	1,150	1,550

Table 5. Characteristics of K value with sediment condition

Classification	Sediment conditions	Constant K value		
		K _{clay}	K _{silt}	K _{sand}
1	always deep submerged(water level: over 30 cm)	256	91	0
2	always shallow submerged(water level: below 30 cm)	135	29	0
3	always out of water (water level: almost 0 cm)	0	0	0

Table 6. Sediment depth prediction in each site with periods

Site	Contents	Prediction periods(year)	Area (m ²)	Rainfall(90 days)			Fine(275 days)			Total sedimentation depth(cm)
				Wt (kg/m ³)	weight (kg)	depth (cm)	Wt (kg/m ³)	weight (kg)	depth (cm)	
A		1	7,381	1,097	10,710	0.13	1,052	16,363	0.21	0.34
		5		1,140	53,550	0.64	1,097	81,813	1.01	1.65
		10		1,163	107,100	1.25	1,121	163,625	1.98	3.23
		15		1,178	160,650	1.85	1,136	245,438	2.93	4.77
		20		1,189	214,200	2.44	1,147	327,250	3.86	6.31
B		1	9,227	1,088	12,510	0.12	1,064	32,313	0.33	0.45
		5		1,132	62,550	0.6	1,112	161,563	1.58	2.17
		10		1,156	125,100	1.17	1,137	323,125	3.08	4.25
		15		1,170	187,650	1.74	1,153	484,688	4.56	6.29
		20		1,181	250,200	2.3	1,165	646,250	6.01	8.31
C		1	3,514	1,154	3,510	0.07	1,112	11,275	0.29	0.38
		5		1,192	17,550	0.42	1,154	56,375	1.39	1.81
		10		1,212	35,100	0.82	1,176	112,750	2.73	3.55
		15		1,224	52,650	1.22	1,190	169,125	4.04	5.27
		20		1,234	70,200	1.62	1,200	225,500	5.35	6.97
D		1	7,027	1,091	13,320	0.17	1,095	26,125	0.34	0.51
		5		1,135	66,600	0.84	1,137	130,625	1.63	2.47
		10		1,158	133,200	1.64	1,160	261,250	3.2	4.84
		15		1,172	199,800	2.42	1,175	391,875	4.75	7.17
		20		1,184	266,400	3.2	1,185	522,500	6.27	9.48

Table 6은 상기 식 (11), (12) 및 Table 4~5를 이용해 각 open water 별 퇴적물 기초 자료를 바탕으로 조사 시기를 강우시(1차 조사), 평수시(2, 3차 조사 평균)로 나누었다. 또한, 각 지점의 퇴적물량을 부피로 환산, 그 지점의 전체 면적에 대한 퇴적깊이를 알아보았으며, 향후 1년에서 20년까지의 퇴적물 깊이를 5년 간격으로 추정해 보았다. 상수 W, K 값은 Table 5의 분류 1을 적용하여 계산하였다.

향후 open water 내에 축적 가능한 sediment 양을 추정한 결과 20년 후 각 지역의 침전 깊이는 A: 6.3 cm, B: 8.3 cm, C: 7.0 cm, D: 9.5 cm로 침전지인 A 지역보다 B, C, D에서의 축적율이 높은 것으로 조사 되었다. 위의 결과로부터 침전지에 퇴적된 퇴적물에 대한 처리는 시급한 것으로 보이지 않지만, 하류 습지의 입자성물질 퇴적부하를 줄이기 위해서는 현 침전지의 면적을 늘이거나 퇴적속도를 증가시키기 위한 구조물 설치 방안 등은 필요할 것으로 판단된다.

3.2.2. 퇴적물내 유기물 및 영양염류 함량

sediment trap 안에 침전된 퇴적물내의 유기물 함량을 분석한 결과(Fig. 10) 강우량이 많았던 1차 조사 시기에 9~26 mg/m²day의 범위로 다른 시기 1~17 mg/m²day에 비해 높은 것으로 나타났다.

COD 및 N, P의 경우 2, 3차 조사시기와 비교해 1차 시기의 입자성 물질의 퇴적량이 상대적으로 많아 흡착량이 증가 되었으며 또한, A지역 보다는 B, C, D 지역으로 갈수록 축적량이 증가되는 것으로 나타났다.

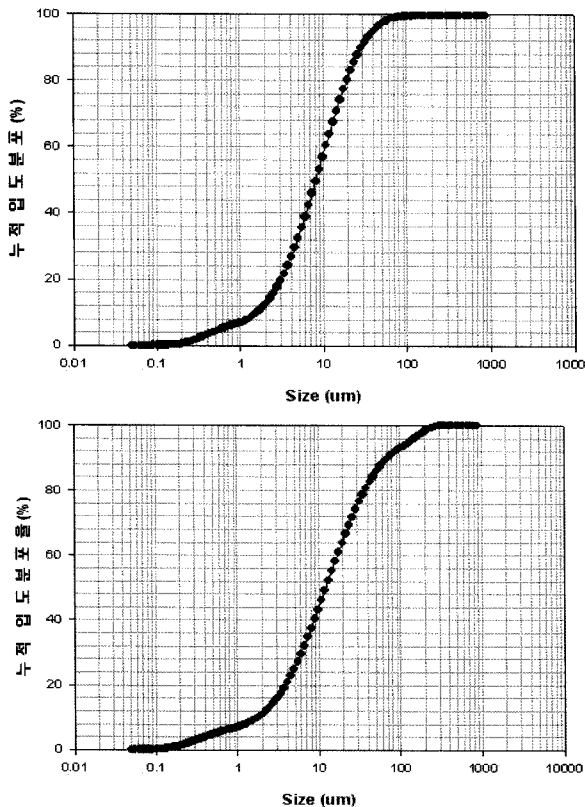


Fig. 9. Characteristics of particle distribution in sediment trap.

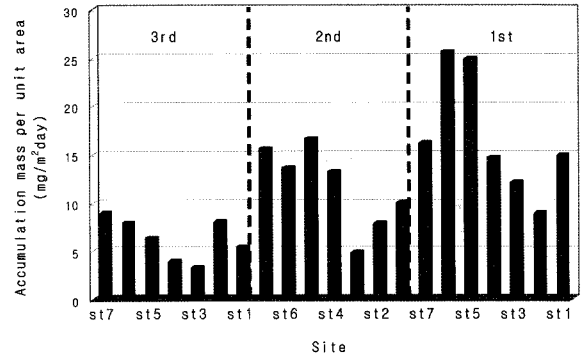


Fig. 10. Accumulation of chemical oxygen demand(COD) in sediment within a sediment trap.

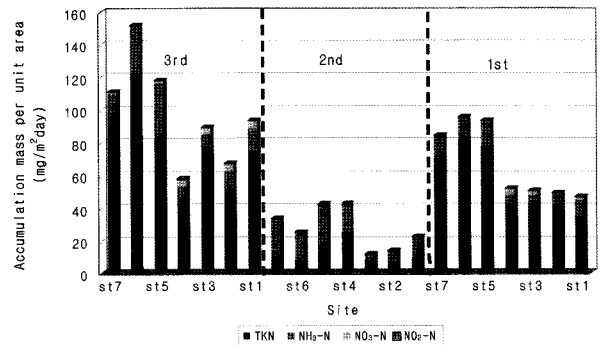


Fig. 11. Accumulation of nitrogen in sediment within a sediment trap.

Fig. 11은 총질소를 유기질소(TKN)와 무기질소로 구분하여 단위면적당 일 축적량(mg/m²day)으로 나타낸 것으로서 평균 70% 이상이 유기질소의 형태로 존재하였다.

이는 반월천 상류에 산재되어있는 축산 농가 및 농경지로부터 유입되는 유기질소가 완전 분해되지 않은 상태에서 습지로 유입되어 분해되는 과정에 있다고 판단할 수 있다. 이는 지점별로 하류로 내려 갈수록 NH₃-N, NO₃-N 형태의 비율이 증가되는 것으로도 확인할 수 있는데 이는 유기질소의 형태가 습지 내에서 호기 및 혐기조건의 반복과정을 통해 분해되면서 무기질소 형태로 변환되기 때문으로 판단할 수 있다. 침전지 보다 하류 쪽으로 내려 갈수록 질소 농도가 증가하는 이유는 퇴적물에 흡착되어있던 입자성 물질이 유량 및 유속의 영향으로 하류부에 침전되고, 퇴적물 내에서 고사된 식물체 및 축적된 유기질소의 원인으로 판단된다.

trap에 퇴적된 인의 형태별 분석을 조사기간별로 살펴본 결과 강우시기의 1차 조사에 입자성 인(particulate phosphorus, PP)이 용존성 인(dissolved total phosphorus, DTP)보다 98% 높게 나타나 입자성 물질 퇴적시 흡착된 인의 함량이 높음을 알 수 있다. 특히, A지역에서의 PP 비율이 B, C, D지역 보다 상대적으로 높게 나타났다. 이는 침전지인 A지역에서 원수 내에 포함되어있던 입자성 물질이 이 지역에 침전되면서 비율이 많아진 것으로 판단되며 A지역 중에서도 원수의 영향을 가장 많이 받는 st. 1에서 입자성 인의 비율이 대체로 높은 것으로 조사되었다(Fig. 12).

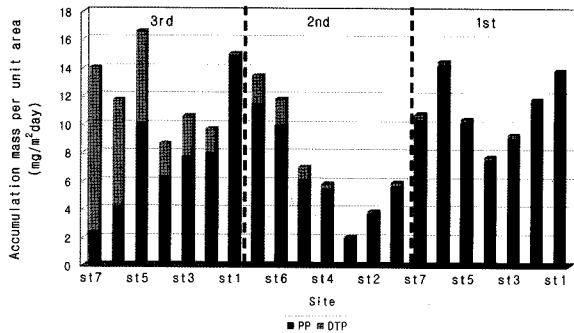


Fig. 12. Accumulation of phosphorus in sediment within a sediment trap.

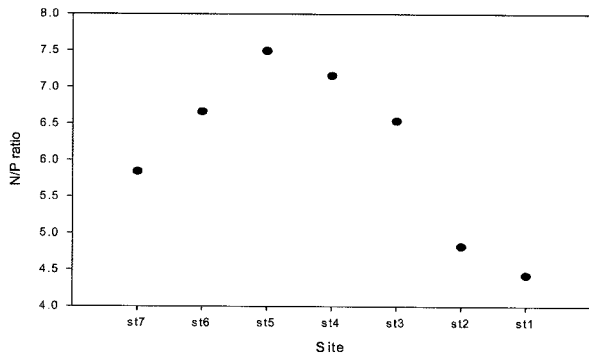


Fig. 13. N/P ratio in sediment within a sediment trap.

퇴적물의 N/P ratio를 살펴본 결과 1~3차 data를 평균해 볼 때 4.3~7.8을 나타내었고 A 지역보다는 하류 쪽에서의 N/P 비율이 높게 나타났다. 이러한 원인은 Fig. 11~12에서 살펴본 바와 같이 T-N의 경우 하류쪽으로 갈수록 증가율이 커졌으며 T-P의 경우 상류부에서의 비율이 상대적으로 컸기 때문에 지점별 N/P ratio의 변화가 나타났다.

4. 결론

조성된 후 4년이 경과된 시화호 인공습지의 물흐름은 습지 내의 습지식물이 식재되어 있는 closed water에 비해 수로 및 open water로 치우치는 경향을 보였다. 이는 조성된 후 4년이 경과 되면서 가져온 환경변화에 의해 나타난 자연현상으로 closed water 지역에 지속적인 습지식물의 고사체가 퇴적되어 물흐름을 저해하는 것으로 판단된다. 물흐름이 저조한 지역에서는 용존산소 고갈현상, 영양염류 용출형 인공습지의 수질정화 효율을 저해하는 요인이 될 수 있으므로 습지의 수질정화 효율을 지속 또는 향상시키기 위해서는 주기적으로 수리특성 조사를 통한 개선대책이 필요할 것으로 판단된다.

한편, 반월천 고습지 총 7개 지역에 sediment trap을 설치하여 입자성 물질의 퇴적율을 측정된 결과 습지내의 퇴적물 증가 문제는 미미한 것으로 나타났다. 그러나, 침전지의 침전 효율이 평균 30%로 유입된 입자성물질의 70%는 인공습지 내에 유입되므로 습지내 입자성물질의 퇴적부하를 증가시킬 수 있다. 현 인공습지의 입자성물질 부하를 줄이기 위해서는 현 침전지의 면적을 늘이거나 퇴적속도를 증가시키기 위해

구조물 설치 등의 방안이 필요할 것으로 판단된다.

Sediment trap 안에 침전된 입자성 물질의 유기물 함량을 분석한 결과 강우량이 많았던 1차 조사 시기에 유기물 함량이 전반적으로 높았으며 침전지인 A지역 보다는 B, C, D지역으로 갈수록 COD 측정량이 증가되는 것으로 나타났는데 이는 하류지역으로 내려갈수록 입자가 작은 silt 및 clay 성분이 증가되기 때문으로 판단된다. 질소 및 인의 경우도 하류로 내려갈수록 증가하는 경향을 나타내었는데 유기물과 동일한 경향 때문으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국농어촌연구원, “습지의특성분석및관리대책연구(VIII),” 10~12(2003).
2. Cowardin et al., “Classification of wetlands and deep-water habitats of the United State, U.S. Department of interior, fish and wildlife service office of biological services,” pp. 74~82(1979).
3. Mitsch, W. J. and Gosselink, J. G., “Wetlands: wetlands-their history, science and management,” Van Norstrand Reinhold, pp. 3~20(1993).
4. Mulamootil, G., Warner, B. G., and McBean, E. A., “Wetland: environmental gradients, boundary and buffer,” Lewis Publisher, 38~64(1996).
5. United State Environmental Protection Agency., “Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment,” USEPA 625/1-88/022, 83 PF(1998).
6. Water Pollution Control Federation. “Wetland systems, in manual of practice: natural systems,” MOP FD-16 WPCF, pp. 84~92(1990).
7. Reed, S. C., Middlebrooks, E. J., and Crites, R. W., “Natural systems for waste management and treatment,” McGraw-Hill, New York, pp. 32~64(1988).
8. Fisher, P. J., “Hydraulic characteristics of constructed wetlands at Richmond,” NSW, Australia, in constructed wetlands in pollution control. Pergamon Press, New York, pp. 21~43(1990).
9. Urban, D. T., “Methods of determining residence time distribution in a reconstructed wetland,” MSE thesis, Illinois institute of technology, pp 69~72(1990).
10. Kadlec, R. H., Bastiaens, W., and Urban, D. T., “Constructed wetland for water quality improvement: Hydrological design of free water surface treatment wetlands,” Lewis Publishers, pp. 77~82(1993).
11. Levenspiel, O., “Chemical reaction engineering,” 2nd ed. John Wiley & Sons, New York, pp. 52~73(1972).
12. Angela, Y. L., Jean, F. D., Jeffrey, A. C., and Martin, R., “Comparison of rhodamine WT and bromide in the determination of hydraulic characteristics of constructed

- wetlands," *Ecological Engineering*, **20**, pp. 75~88(2003).
13. Kadlec, R. H., "Hydrologic factors in wetland water treatment, in constructed wetlands for wastewater treatment," D. A. Hammer, Ed. Lewis, Chelsea, MI, pp. 21~36(1989).
 14. Håkanson, L., Jansson, M., "Principles of lake sedimentology," The Blackburn Press, pp. 53~60(1983).
 15. 한국수자원공사, "시화호 인공습지 운영관리방안 연구," pp. 25~50(2002).
 16. 해양수산부, "해양환경공정시험방법," pp. 37~66(2002).
 17. Everts, C. J., Kanwar, R. S., "Evaluation of rhodamine WT as an adsorbed tracer in an agricultural soil," *J. Hydrol.*, **153**, pp. 53~70(1994).
 18. Shiau, B. J., Sabatini, D. A., Harwell, J. H., "Influence of rhodamine WT properties on sorption and transport in subsurface media," *Ground Water*, **31**(6), pp. 913~920(1993).
 19. 이경도, "Treatment characteristics of prototype free water surface(FWS) constructed wetland for stream water purification," 서울대학교 석사학위 논문(2000).
 20. Walter, J., Weber, J. R., and Francis, A. D., "Process dynamics in environmental systems," pp. 633~641(1996).
 21. 수원 기상대, "<http://suwon.kma.go.kr/>,"(2005).
 22. 윤용남, "수리학: 기초와 응용," 청문각, pp. 48~82(1995).